

实验十五 YAG激光器的倍频

一 实验目的

1. 了解激光倍频的基本原理，掌握外腔倍频技术；
2. 测量KDP晶体对YAG激光的倍频前后的波形变化，以及效率。

二 基本原理

2.1 非线性频率转换

光与物质相互作用的过程，本质上是光作用于物质原子，引起物质极化，以及偶极矩作为新的辐射源向外辐射电磁波的过程[27, 26]。原子是由带正电的原子核，和带负电荷的核外电子组成，当频率为 ω 的光入射介质后，引起负电中心相对正电中心发生位移，形成电偶极矩

$$m = er$$

其中， e 是负电荷中心的电量。我们定义单位体积内原子偶极矩的总和为极化强度矢量 P ，

$$P = Nm$$

式中， N 是单位体积内的原子数。极化强度矢量 P 和入射场 E 的关系通常可以表示为如下形式：

$$P = \xi^{(1)}E + \xi^{(2)}E^2 + \xi^{(3)}E^3 + \dots \quad (15.1)$$

其中 $\xi^{(1)}$ 为线性极化率， $\xi^{(2)}$ 为二阶非线性极化率、 $\xi^{(3)}$ 为三阶非线性极化率。并且 $\xi^{(1)} \gg \xi^{(2)} \gg \xi^{(3)}$ ，每增加一次极化， $\xi^{(i)}$ 值减少七八个数量级。由于入射光是变化的，即 $E = E_0 \sin(\omega t)$ ，所以极化强度也是随时间周期变化的。根据电动力学的原理，变化的极化场能够产生电磁波。在入射光的电场比较小时（远小于原子内的场强度），由于 $\xi^{(2)}$ ， $\xi^{(3)}$ 等值极小， P 与 E 成线性关系为 $P = \xi^{(1)}E$ 。新的光波与入射光具有相同的频率，这就是通常的线性光学现象。但当入射光的电场较强时，不仅有线性现象，而且还会出现非线性现象；即新的光波中不仅有入射光波的频率，还有二次谐波（频率为入射频率的两倍）、三次谐波（入射频率的三倍）等频率产生，形成能量转移和频率变换。

虽然很多介质都可产生非线性效应，但在具有中心结构的晶体和各向同性介质（如气体）中，由于方程(15.1)中的偶级项为零，只含有奇级项，因此要观测二阶非线性效应，只能在具有中心非对称的晶体中实现，如KDP(或KD*P)、LiNbO₃晶体等等。

从耦合波理论出发，分析二阶非线性效应的产生，发现二阶效应可用于实现倍频、和频、差频及参量振荡等过程。当只有一种频率为 ω 的光入射介质时，二阶非线性效应就只有除基频外的一种频率，即 2ω 频率的光波产生，称为二倍频或二次谐波。在二阶非线性效应中，二倍频又是最基本、应用最广泛的一种效应。世界上第一次非线性光学实验，就是在首台红宝石激光器问世后不久，利用红宝石 $0.693\mu\text{m}$ 激光在石英晶体中观察到紫外倍频激光。后来又有人利用该方法将 $1.06\mu\text{m}$ 的红外激光转换成 $0.532\mu\text{m}$ 的绿光，从而满足了水下通信和探测等工作对波长的要求。目前为止，光倍频仍然是最有使用价值的一个非线性光学效应。

当 $\omega_1 \neq \omega_2$ 时，将会产生 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 的光波，该过程叫和频。如果入射的光波分别为 ω 和 2ω ，和频后得到 3ω ， $3\omega = \omega + 2\omega$ （注意，它数值上等于三倍频，但不是三倍频非线性效应过程）。本实验将对倍频进行观测。

2.2 相位匹配及实现方法

从前面式(15.1)可以看出，极化强度与入射光强，及非线性极化系数有关。是否只要入射光足够强，使用非线性极化系数足够大的晶体，就一定能获得好的倍频效果呢？答案是否定的，非线性光学过程中还有一个非常重要的因素—相位匹配。

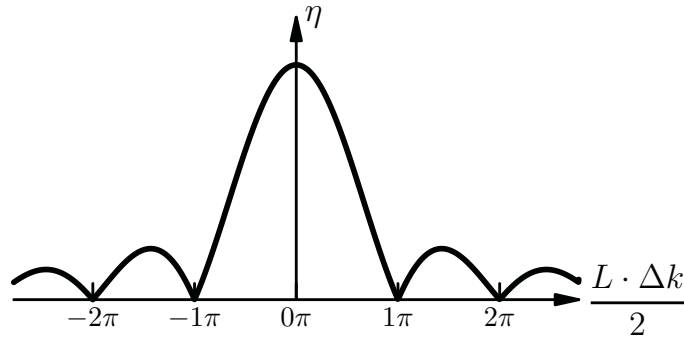


图 15.1: 倍频效率与位相失配量 Δk 之间的关系。

实验证明，只有具有特定偏振方向的线偏振光，以某一特定角度入射晶体时，才能获得良好的倍频效果，而以其他角度入射时，则倍频效果很差，甚至完全不出倍频光。根据倍频转换效率的定义：

$$\eta = \frac{P^{(2\omega)}}{P^{(\omega)}}$$

由理论推导可得（为突出物理图像和实验技术，理论推导在此不作详细介绍）

$$\eta = \frac{\sin^2(L \cdot \Delta k / 2)}{L \cdot \Delta k / 2} dL^2 E_\omega^2 \quad (15.2)$$

η 与 $L \cdot k/2$ 关系曲线见图15.1所示。从图中可看出，要获得最大的转换效率，就要使 $L \cdot \Delta k = 0$ ， L 是倍频晶体的有效长度，不等于0，因此必须满足 $\Delta k = 0$ ，即

$$\Delta k = 2k_1 = k_2 = \frac{4\pi}{\lambda_1} (n^{(\omega)} - n^{(2\omega)}) = 0 \quad (15.3)$$

也就是说：

$$n^{(\omega)} = n^{(2\omega)}$$

$n^{(\omega)}$ 和 $n^{(2\omega)}$ 分别为晶体对基频光和倍频光的折射率。即只有当基频光和倍频光的折射率相等时，才能产生好的倍频效果，方程(15.3)是提高倍频效率的必要条件，称作相位匹配条件。

由于 $v_\omega = c/n^{(\omega)}$ ， $v_{2\omega} = c/n^{(2\omega)}$ ，其中 v_ω 和 $v_{2\omega}$ 分别是基频光和倍频光在晶体中的传播速度。满足式(15.3)，就是要求基频光和倍频光在晶体中的传播速度相等。由此可以得出位相匹配的本质就是使基频光在晶体中沿途各点激发的倍频光传播到出射面时，都具有相同的相位，这样可相互干涉增强，从而达到高效率的倍频输出。否则倍频信号将会相互干涉削弱，甚至完全抵消。

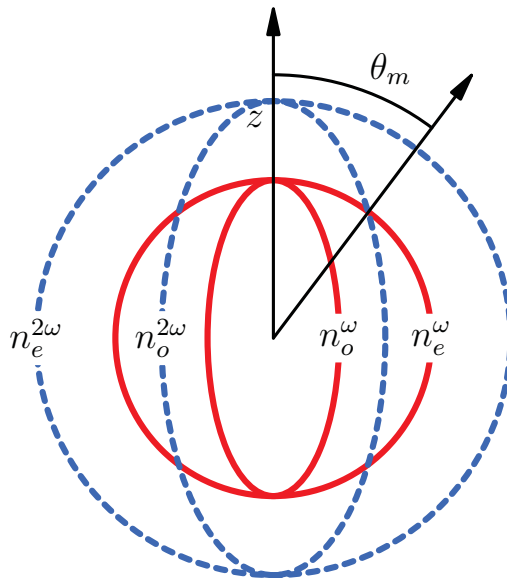


图 15.2: 负单轴晶体折射率球，以及位相匹配关系。

表 15.1: 几种常用晶体的折射率以及相位匹配角 $\times m^\circ$

晶体	$\lambda(\mu m)$	n_o	n_e	θ_m
铌酸锂	1.064	2.231	2.150	87°0'
	0.532	2.230	2.230	
碘酸锂	1.064	1.860	1.719	29°30'
	0.532	1.901	1.750	
KD*P	1.064	1.495	1.455	30°57'
	0.532	1.507	1.467	

表 15.2: 单轴晶体的相位匹配条件

晶体种类	第一类位相匹配		第二类位相匹配	
	偏振性质	位相匹配条件	偏振性质	位相匹配条件
正单轴	$e + e \rightarrow o$	$n_e^\omega(\theta_m) = n_o^{2\omega}$	$o + e \rightarrow o$	$[n_o^\omega + n_e^\omega(\theta_m)]/2 = n_o^{2\omega}$
负单轴	$o + o \rightarrow e$	$n_e^{2\omega}(\theta_m) = n_o^\omega$	$o + e \rightarrow e$	$[n_o^\omega + n_e^\omega(\theta_m)]/2 = n_e^{2\omega}(\theta_m)$

实现相位匹配条件的方法

由于一般介质都存在正常色散，即频率大的折射率也大，一般情况下 $n^{(2\omega)} - n^{(\omega)}$ 大约为 10^{-2} ，所以 $\Delta k \neq 0$ 。但对于各向异性晶体，由于存在双折射，因此我们可利用不同偏振光间的折射率关系，寻找相位匹配条件，实现 $\Delta k = 0$ 。此方法常用于负单轴晶体 ($n_e^\omega < n_o^\omega$)。图15.2中画出了晶体中基频光和倍频光的两种不同偏振态，所对应的折射率椭圆之间的关系。图中实线、虚线球面分别为基频光、倍频光的折射率椭球面。球面为 o 光的折射率面，而椭球面为 e 光的折射率， z 轴为光轴。

实现相位匹配的过程就是寻找实面和虚面交点位置，从而得到通过此交点的矢量与光轴的夹角。从图15.2中可以到，基频光的 o 光折射率可以和倍频光中 e 光的折射率相等，所以当光波沿着与光轴成 θ_m 角方向传播时，即可实现相位匹配，该角度 $\times m$ 叫做相位匹配角。由折射率椭球方程及其相位匹配条件，可以得到 θ_m 的关系式：

$$\sin^2 \theta_m = \frac{(n_o^\omega)^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}{(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}} \quad (15.4)$$

式中 n_o^ω , $n_o^{2\omega}$, $n_e^{2\omega}$ 都可以查表得到，表 15.1列出几种常用非线性晶体的具体数值。

注意，相位匹配角是指在晶体中基频光相对于晶体光轴 z 方向的夹角，而不是与入射面法线的夹角。为了减少反射以及便于调节，实验中总希望让基频光垂直入射到晶体表面。所以制作倍频晶体时，须按一定方向切割晶体，以使晶体法线方向和光轴方向成 θ_m ，见图 15.3。

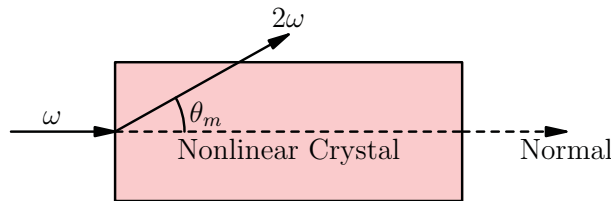


图 15.3: 非线性倍频晶体的切割方向示意图。

上面所述的是入射光以一定角度入射到晶体上，通过晶体的双折射，由折射率的变化来补偿正常色散而实现的相位匹配，这称为角度相位匹配。此外还有温度匹配，温度匹配是指调节入射光波与光轴垂直，通过升高晶体的温度使晶体内倍频光的折射率等于基频光的折射率。但无论采取何种相位匹配方式，单轴晶体还是双轴晶体，均有两类偏振构型：

第一类是平行式，即入射光与倍频光为同一种线偏振，如单负晶体将两个 o 光光子转变为一个倍频的 e 光光子。第二类是正交式，即入射光中同时含有 o 光和 e 光两种偏振光，如单负晶体将两个不同偏振的光子转换为一个倍频的 e 光光子，单正晶体变为一个倍频的 o 光光子，具体情况见表15.2。本实验用的是负单轴KDP晶体第一类角度相位匹配。

在影响倍频效率的众多因素中，除前面所述比较重要的几个方面之外，还需考虑到晶体的有效长度 L_s 和模式条件。图 15.4为晶体中基频光和倍频光振幅随距离的变化曲线。如果晶体过长，例如 $L > L_s$ 时，会造成倍频效率饱和；如果晶体过短，即 $L \ll L_s$ ，则转换效率比较低。 L_s 的大小给出了倍频技术中应该使用的晶体长度。另外，激光模式的不同也影响转换效率，例如高阶横模，方向性差，偏离光传播方向的光会偏离相位匹配角。所以在不降低入射光功率的情况下，以选用基横模或低阶横模最佳。

倍频光的脉冲宽度和线宽

通过对倍频光脉冲宽度 Δt 和相对线宽 $\Delta\nu$ 的观测,可得出两种线宽都比基频光变窄的现象。这是由于倍频光与入射基频光强的平方成正比的缘故。在图15.5中,假设在 $t = t_0$ 时,基频和倍频光具有相同的极大值。基频光在 t_1 和 t'_1 时,功率为峰值的1/2,脉冲宽度 $\Delta t_1 = t'_1 - t_1$ 。而在相同的时间间隔内,倍频光的功率却减小为峰值的强度的1/4,倍频光的半值宽度,即 $t'_2 - t_2 < t'_1 - t_1$,因此脉冲宽度变窄。同理可得到倍频后的谱线宽度也会变窄。

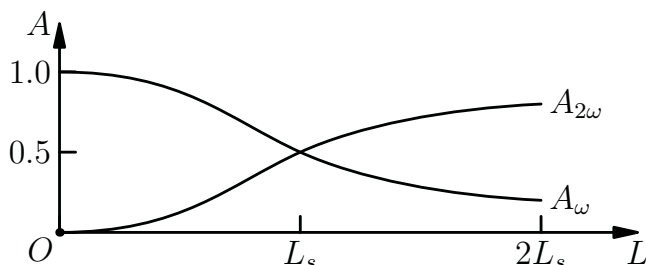


图 15.4: 晶体中基频和倍频光振幅随距离变化关系。

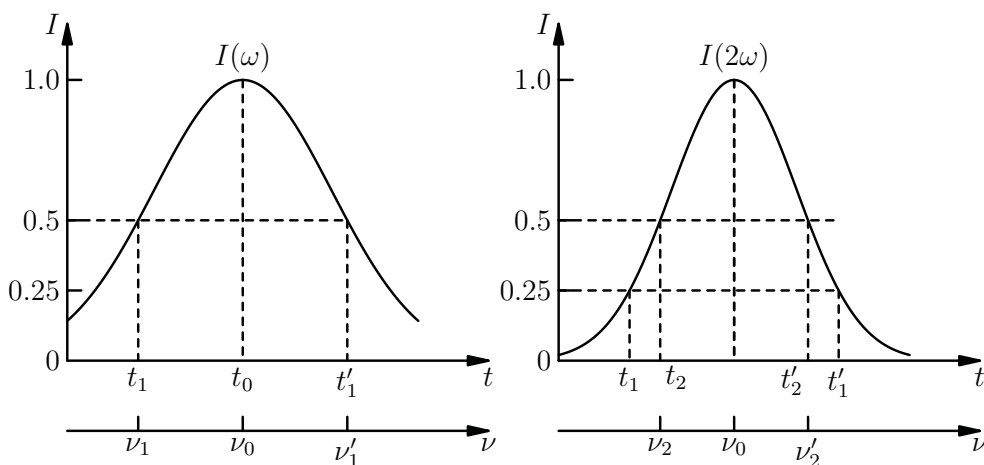


图 15.5: 基频和倍频光的脉宽及相对线宽的比较。

三 实验装置与步骤

本实验要求正确搭建光路,调节激光器,得到形态较好的基模高斯光束输出。然后测量该激光特性参数在倍频前后的变化,以及倍频效率的大小,倍频晶体的方位变化对倍频效率的影响等等。

3.1 实验装置

本实验所提供的装置有:电光调Q的Nd³⁺:YAG 固体激光器及电源,倍频晶体,能量计、PIN输出功率探测器、数字存储示波器。

实验装置如图15.6所示。该实验是在一个电光调Q的Nd³⁺:YAG 固体激光器的基础上进行的,也可以非调Q的激光器上进行。采用外腔倍频方式进行,倍频晶体采用KDP。在倍频晶体后面,接了一个45度的短波通,可以让532nm的绿光(倍频后的光)直接通过,而1064nm的红外光将横向输出,打到边缘的一个吸收体上,将没有被转换的1064nm的红外激光被吸收掉。倍频晶体已经按最佳匹配角加工好,激光只需垂直它的通光面通过即可,否则必须微调激光光束的入射角,直至找到最佳匹配角。假如基波光功率不够强的话,激光输出镜和倍频晶体之间加入一个透镜,有助于观察到绿光。

3.2 倍频实验操作

Nd³⁺:YAG 固体激光器电源的操作步骤及注意事项详见实验牌,同学在操作前必须认真仔细阅读!

1. 检查Nd³⁺:YAG固体激光器水路系统是否正确和正常;
2. 检查Nd³⁺:YAG 固体激光器的电路系统接线是否正确和正常;

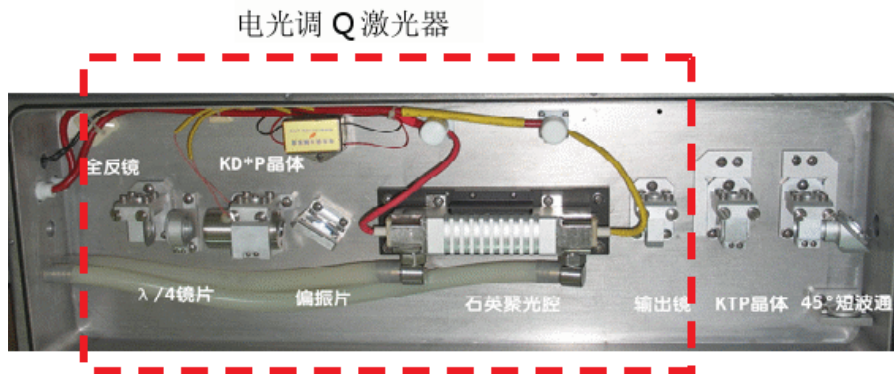


图 15.6: 倍频实验装置图。

3. 检查Nd³⁺:YAG 固体激光器的光路系统是否正确。
4. 如果水路、电路、光路系统正常，请示老师是否可以接通激光电源。
5. 接通激光电源，逐渐增加泵浦电压。放一张黑纸于激光输出光路中，如果一个激光脉冲可把黑纸烧一焦斑，这时便证实有1.064μm激光输出，从焦斑大小判别它功率大小。
6. 若Nd³⁺:YAG 固体激光器输出已经基本正常，用能量计测量红外激光脉冲的输出能量，和任课老师给出的红外激光脉冲的标准输出能量值相比，是否到达基本要求。如果已经达到要求，记录红外激光脉冲的能量和输出波形。
7. 完成上述基本实验准备之后，请示老师是否可以进行下面的倍频实验。
8. 将倍频的KDP晶体沿轨道垂直地逐步推入光路，观察是否出现绿光，当绿光出现之后，将45度短波通沿轨道逐步推入光路，最后适当调节位置，使其正常工作。
9. 精心地调节KDP倍频晶体的位置，使倍频绿光最强。再用能量计测量绿光的功率与脉冲形状。
10. 计算倍频效率，比较倍频前后脉冲波形的变化。
11. 在所条件都不变的情况下，稍微改变倍频晶体的方位，测量其倍频效率，以及波形变化。近似得出倍频效率随入射角度的变化关系，在此基础上深入理解角度相位匹配意义。

四 思考题

实验完成后，请思考如下的问题：

1. 激光倍频过程的物理原因是什么？
2. 要实现高效率的倍频过程，必须具备哪些必要条件？
3. 位相匹配在倍频过程中起什么作用，利用哪些手段可以实现位相匹配。结合本实验的具体情况，详细说明。

注意事项

注意：本实验所的激光波长为1064nm，不再可见光范围，并且输出光强较大，属于强激光，能够将人眼致盲；因此实验时必须严格按照实验操作规程，佩戴防护眼睛，以免被激光所伤害。请同学们认真阅读附录中给出的“安全须知”，并且尊章操作。